



TITLE:

Nonlinear Seismic Responses of High-Speed Railway System considering Train-Bridge Interaction(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Lu, Xuzhao

CITATION:

Lu, Xuzhao. Nonlinear Seismic Responses of High-Speed Railway System considering Train-Bridge Interaction. 京都大学, 2020, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2020-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k22418>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開; 許諾条件により本文は2021-04-30に公開; 許諾条件により要約は2021-03-22に公開; 1.Finite element analysis framework for dynamic vehicle-bridge interaction system based on ABAQUS. XUZHAO LU, KAI-CHUN CHANG, CHUL-WOO KIM ("International Journal of Structural Stability and Dynamics" December 2019, Accepted) 2.Longitudinal seismic response of train-bridge interaction system with slip in moderate earthquakes. XUZHAO LU, KAI-CHUN CHANG, CHUL-WOO KIM("ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems Part B:Mechanical Engineering" November 2019, Accepted)

京都大学	博士（工学）	氏名	Xuzhao Lu
論文題目	Nonlinear Seismic Responses of High-Speed Railway System considering Train-Bridge Interaction（列車－橋梁連成系を考慮した高速鉄道システムの地震時非線形応答解析）		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文は、新幹線橋梁の耐震性能評価における列車の影響を明らかにするために、高速で走行する列車および地震時に緊急停車する列車が新幹線橋梁の地震時の非線形応答に及ぼす影響について検討を行った結果を取りまとめており、8章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、研究背景と目的について述べ、世界諸国における高速鉄道整備の現状と脱線事故および地震時の新幹線橋梁の被害についてまとめている。また車両－橋梁連成系および地震時の車両－橋梁連成系の挙動に関連した研究動向についてまとめている。</p> <p>第2章では、大規模地震時の新幹線橋梁と列車との連成を考慮した非線形地震応答解析のフレームワーク構築に関連して、車両－橋梁連成系の数値解析のための有限要素法の適用について理論的な展開をまとめている。また、列車の車輪と橋梁上のレールとの連成を接触問題として扱うため、ペナルティ法による解法をまとめている。加えて、車両－橋梁連成系の連成微分方程式の数値積分法として導入した Hilber-Hughes-Taylor-α (HHT- α)法による車両－橋梁連成系の解法についても述べている。</p> <p>第3章では、提案解析手法の妥当性検証について述べている。まず、一自由度系の車両を持つ単純ばりの解析的動的応答と閉じた形の解の動的応答を比較し提案手法が妥当であることを示している。次に、供用中の新幹線橋梁の実測加速度およびその周波数スペクトルと新幹線車両の1両を15自由度系モデルした16両編成列車走行による新幹線橋梁のシミュレーション結果との比較検討を行い、解析手法が妥当性であることを示している。</p> <p>第4章では、中規模地震における新幹線橋梁の橋軸方向の線形地震応答について行った検討結果を報告している。まず、中規模地震時においても橋梁上に緊急停止した列車が滑る可能性があることを解析的に明らかにしている。一方で、車両の滑りを考慮せず車輪とレールが固着状態である仮定で行なった地震応答解析から、滑りを考慮しないことにより橋軸方向の地震応答が過大評価される可能性を指摘している。また、計算負荷が大きい車両－橋梁連成系の滑り解析を行うことなく、簡易的に地震時の橋梁の橋軸方向の応答と列車の緊急停止による橋梁の橋軸方向の動的応答を重ね合わせることで橋軸方向の動的応答が評価できることを示している。</p> <p>第5章では、大規模地震における新幹線橋梁の橋軸方向の非線形地震応答について、車輪とレールとの滑りを考慮した検討結果を報告している。地震による橋梁の残留変位を検討した結果、車両を付加質量として考慮している現行の設計は安全側であることを明らかにした。</p> <p>第6章では、都市部に被害を生じさせたノースリッジ（1994年）、神戸（1995年）、台湾 Chichi（1999年）、熊本（2016年）の大規模地震の観測波を用いて新幹線橋梁の橋軸直角方向の地震応答について検討を行った。地震動によっては車両を付加質量として考慮するのは必ずしも安全側の評価にはならないことが解析的に明らかになり、車両－橋梁連成系の地震応答解析の意義を示している。</p> <p>第7章では、本論文で得られた成果について要約し、第8章では、残された課題について論じ、特に列車の脱線メカニズムについての基礎検討を示している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本研究は、構造物の安全性のみならず地震時の緊急輸送路の確保の観点からも重要な課題である新幹線橋梁構造物の耐震性能について検討した成果を報告している。兵庫県南部地震を受けて耐震設計基準の改訂などを進めた結果、平成 23 年の東北地方太平洋沖地震や平成 28 年の熊本地震の被害調査では、一部の橋梁を除いて、地震の揺れによる落橋・倒壊などの致命的な被害は生じていないことが確認された。一方で、地震による新幹線の脱線や新幹線橋梁の損傷が報告されている。本研究は、今まで難しいとされた「大規模地震時の新幹線橋梁と列車との連成を考慮した非線形地震応答解析」のフレームワークを構築し、列車の走行および停車時の新幹線橋梁の地震時の非線形挙動について検討を行った結果を取りまとめたものである。一連の研究より得られた成果は次のとおりである。

- 1) 汎用 FEM 解析ソフトである ABAQUS を用い、列車－橋梁の連成を考慮した非線形地震応答解析フレームワークを構築した。その際に列車の車輪とレールの相互作用は接触モデルを用いて再現している。列車通過時の新幹線橋梁の計測加速度応答とシミュレーションによる加速度応答を比較した結果、加速度の時系列や卓越振動数が概ね再現でき、接触モデルを用いた列車－橋梁連成系の解析手法の妥当性が確認された。
- 2) 地震時に停車する列車の車輪とレールの間の滑りが橋梁の橋軸方向の加速度応答に及ぼす影響について解析的検討を行った結果、中規模の地震のみならず大規模の地震において、橋梁の橋軸方向の加速度応答は地震動に左右されるが、車輪とレールとの間の滑りの影響が無視できることを示している。一方で、地震による橋梁の残留変位を検討した結果、車両を付加質量として考慮している現在の設計は安全側であることを明らかにした。
- 3) 橋軸直角方向の地震応答について、線形範囲での列車－橋梁連成系の中小規模地震による地震応答については、橋梁の地震応答に対して振動系である列車が Tuned Mass Damper (TMD) として機能することが知られているが、橋梁が非線形挙動を示すときの列車の影響については未知であった。提案手法を用いて、大規模地震時の列車－橋梁連成系の非線形応答を検討した結果、線形範囲での検討とは異なり橋軸直角方向の地震応答に対して列車が TMD として機能する保証はなく、むしろ地震応答を増幅してしまうケースが見られ、列車を付加質量としてみならず現行の示方書は必ずしも安全側の評価にならないことを示した。
- 4) 大規模地震における列車の脱線のメカニズムについて、構築された解析手法でシミュレーションを行なった結果、列車の車体と台車の間に生じる幾何学的な非線形性が脱線と深い関係があることを示した。

以上、本論文は、列車－橋梁連成系の非線形地震応答解析フレームワークを提案し、高速列車が鉄道橋の非線形地震応答に及ぼす影響について検討を行い、鉄道橋の耐震性能検討の一助となる知見を示している。以上の成果を考えると、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 2 年 2 月 21 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、（令和 3 年 4 月 29 日までの間）当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。